

颅内游走！脑机接口“动态电极”来了

■本报记者 刁雯蕙

在脑机接口等神经接口系统中，电极是连接电子设备和生物神经系统的核心界面传感器，是“接口”的核心所在。然而，当前植入式电极均是静态的，植入后只能固定位置、局限采集，在免疫反应中“被动挨打”乃至传导失效，严重制约了脑机接口的应用和未来发展。

9月17日，中国科学院深圳先进技术研究院(以下简称深圳先进院)研究员刘志远、副研究员韩飞团队联合研究员徐天添团队，以及东华大学教授严威团队，历经5年多协同攻关的研究成果发表于《自然》。团队成功研发出如头发丝般纤细、柔软可拉伸、可自由驱动的神纤维电极——NeuroWorm(神经蠕虫)。研究首次提出了脑机接口“动态电极”的新范式，打破了植入式电极的静态传统，为脑机接口电极研究与应用开辟了新方向。

植入式脑机接口电极开启“游走”模式

脑机接口分为非植入式、半植入式与全植入式。其中，全植入式脑机接口技术因电极直接与神经元“对话”，可实现其他方式无法企及的监测精度，具有更丰富的功能。然而，传统植入式电极植入后不仅无法动态调整植入位置，也无法对周边环境作出响应性调整。

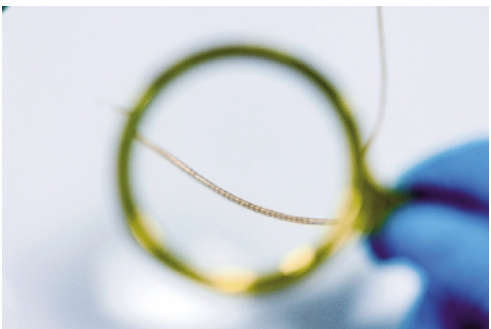
在2020年11月的一次例会上，刘志远和课题组成员讨论：“从临床需求看，如果我们开发出一种非常细、非常软又能运动的多通道纤维电极，或许能弥补当前电极领域的不足。”

但得到这种电极并非易事，不仅要解决多个技术难点，还需要不同领域的工程技术人才一起合作。徐天添团队长期专注于磁驱动微型机器人研究，在磁性材料制备及微纳机器人精确操控方面积累了丰富经验。

针对传统柔性电极的静态特性及其导致的问题，刘志远在和徐天添探讨后，决定两个课题组共同探索如何在柔性电极中引入微小磁性组件，并利用外部磁场使电极植入后仍具备可调节、可运动的动态特性。

研究团队首先要解决的难题，便是如何在一根直径约200微米的纤维上布局数十个独立的电极通道。这相当于在一根头发丝上拆分并雕刻出数十根长度一致、彼此不能交叉的细线，还要保证这根纤维足够柔软、可拉伸。

团队成员谢瑞杰此前制备出厚度仅数百纳米的超薄薄膜电极。在此基础上，他想到，如果将薄膜“卷起来”，就能变成微米尺度的纤维。经过超薄柔性薄膜制备、导电图案设计、软硬接口



放大镜视野下的60通道神经纤维电极。研究团队供图

设计和制造等多个精细步骤，研究团队历时5年多，终于制备出拥有沿着纤维长度方向独立分布的、多达60个通道、直径仅196微米的柔软可拉伸纤维电极。

为了让制备的电极“动起来”，团队在电极一端增加了微小的磁头，结合高精度磁控系统和即时影像追踪技术，使电极能够在体内自主调控前进方向，并稳定记录高质量生物电信号。这样的“动态电极”可以在兔子颅内“游走”，根据需要主动更换监测目标。研究团队将其命名为NeuroWorm。

在外周肌肉上也能“动起来”

研究团队表示，NeuroWorm的诞生不仅为脑机接口开辟了新路径，而且其应用远不止于大脑——他们首次实现了电极在肌肉内的长期植入与稳定工作。

与大脑相比，外周肌肉在运动过程中会产生更大幅度的形变和拉伸，对电极的柔软性、耐久性和信号稳定性提出了更高要求。NeuroWorm凭借微型化、可拉伸的结构优势，在肌肉内依然能紧密贴合组织，并保持高质量信号采集，为外骨骼控制、康复辅助以及日常环境中的人机协同提供了可能。

团队利用微创植入技术，成功使NeuroWorm在大鼠腿部肌肉内稳定工作超过43周。值得一提的是，电极植入13个月，其周围形成的纤维包裹层厚度平均不足23微米，周围组织的细胞死亡率与正常组织相当，展现了优异的长期生物相容性。相比之下，传统不锈钢丝电极在相同条件下包裹层厚度超过451微米，且伴随显著的细胞凋亡反应。

与此同时，在外部磁场的操控下，Neu-

roWorm在肌肉表面实现游走，可在植入后一周内每天变换位置进行监测。

“研究过程中，我们不仅要确保电极信号传输的稳定性、防水性，还要精准控制电极在实验动物体内运动。在很长一段时间里，我们大部分工作是不不断改进、调整，进行动物实验测试，最终得到了符合要求的电极。”韩飞回忆。

“这一成果标志着生物电子学领域的重要突破，使传统的被动固定式植入电极首次迈向可主动控制、智能响应、与生物组织协同运动的全新阶段，为神经系统功能的长期动态监测提供了全新的技术路径。”徐天添表示。

多学科协同助推脑机接口发展

近年来，随着人工智能、神经生物学、生物传感器与柔性电子等的不断突破，脑机接口技术已不再依赖单一学科的驱动，更需要多学科深度融合与协同合作。正是在这一背景下，深圳先进院通过整合院内多科学力量，实现了“动态电极”的新范式突破，同时布局推进柔性生物界面电极的产业化发展。

此前，刘志远团队基于柔软可拉伸导电材料的技术积累，率先实现了柔软可拉伸电极阵列的工程化量产，并通过了相关的二类医疗器械注册，应用于体表高密度肌电监测与刺激等场景，尝试取代传统的硬质不可拉伸电极阵列，已实现向包括欧洲客户在内的电生理公司供货。

“尽管我们取得了一些应用突破，又提出了‘神经蠕虫’的新理念，但电极植入后仍面临免疫排斥和长期稳定工作等挑战。如何实现电极与人体组织更好地融合，提高信号读取精度和稳定性，是未来的重要研究方向。”刘志远表示，未来植入式电极还需在驱动方式、速度控制、材料优化、功能集成、长期相容性等方面开展研究，这需要全球科学家的共同努力。

徐天添介绍，研究团队首次将磁控驱动技术应用于植入式电极，也为磁控微纳机器人领域带来宝贵的经验和数据，有望推广到早期的植入式医疗设备中，为动态监测生理信号提供新的解决方案。

据了解，该研究有望为纤维器件制备提供新思路，也为脑科学研究、神经调控、脑机接口、人机协同等领域提供新工具。未来，研究团队将继续在动态柔性电极和“活性”主动响应型柔性电极领域进行深入研究，推动脑机接口技术的发展进程。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1038/s41586-025-09344-w>



9月15日至21日，以“网络安全为人民，网络安全靠人民——以高水平安全守护高质量发展”为主题的2025年国家网络安全宣传周在全国范围内统一开展。

9月15日，2025年国家网络安全宣传周开幕式在云南昆明举行。网络安全博览会暨网络安全产品和服务国际推介会是其中一项活动，集中展现了网络安全技术、产业、人才、宣传教育等领域的最新成果，凸显科技创新，数字赋能网络安全。

图为植入芯片可信连接的智能眼镜亮相网络安全博览会。图片来源:视觉中国

我国科学家提出广义纽曼定理修正传统理论

本报讯(记者王敏)近日,中国科学技术大学郭光灿院士团队教授何力新、博士生庞鸿升提出了广义纽曼定理(Neumann定理),统一解释了传统铁电与新近发现的分数量子铁电,修正了长期以来铁电材料研究的经典理论。这一成果为理解和调控铁电性质提供了全新思路。相关研究成果发表于《物理评论快报》。

铁电作为一种基本的物理效应,长期以来备受学术界与产业界的高度关注。在铁电研究中,纽曼定理被视为判定铁电性的基本准则而写入教科书。然而,近年来科学家在一些晶体中发现了一类全新的铁电现象——分数量子铁电,与经典纽曼定理的结论相矛盾。

传统的纽曼定理判断晶体是否允许出现铁电极化的数学形式为 $R_p=p$,其中 R 表示晶体的对称操作, p 表示电极化。按照这一关系,只有当电极化在晶体所有对称操作下保持不变时,铁电性才可能存在。这一定理长期以来被视为铁电性的基本原则。研究人员提出了广义纽曼定理,其数学形式为 $R_p=p+Q$,其中 Q 是整数量子的电极化。当 $Q=0$ 时,这一定理退化为传统形式;而在更一般的情形下,它能够自然解释分数量子铁电性的存在。

基于这一定理,研究人员系统分析了全部32个晶体点群,找到了所有可能存在的分数量子铁电形式,并通过高通量计算,发现大量此前

被认为不可能出现铁电行为的材料,其实都允许铁电极化的存在。更重要的是,其中许多材料的极化不仅存在,而且能够翻转,具有潜在的实际应用价值。

研究人员介绍,广义纽曼定理为传统铁电与分数量子铁电建立了统一的理论框架,不仅为分数量子铁电的起源提供了简洁、清晰的物理图像,也奠定了坚实的理论基础,有望改变铁电研究教科书。分数量子铁电性为铁电家族开启了新篇章,具有广阔的探索前景和巨大的应用潜力。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1103/trhd-kxmi>

《2025 年全球创新指数报告》发布——我国首次跻身全球创新指数前十

本报讯(记者李晨)9月16日,世界知识产权组织(WIPO)发布《2025 年全球创新指数报告》(以下简称《报告》)。《报告》显示,中国排名首次跻身全球前十,已提升至全球第10位,稳居36个中等偏上收入经济体之首。据悉,2013年以来中国排名累计上升25位。

《报告》从创新投入和创新产出两大方面,对全球139个经济体的创新生态系统表现进行综合评价排名,设置了制度、人力资本和研究、基础设施、市场成熟度、商业成熟度、知识和技术产出、创意产出等7个领域,共21项二级指标和78项细分指标。

《报告》显示,中国在创新产出方面长期处于世界前列,优势明显,2025年排名第5位,较2024年上升2位;创新投入排名全球第19位,较2024年上升4位。

根据《报告》,中国在多项知识产权相关细分

指标上位居全球第一,包括单位国内生产总值(GDP)本国人工工业品外观设计专利申请量、实用新型专利申请量、商标申请量、创意产品出口额在贸易总额中的占比等均排名全球第一。

同时,中国的创新集群数量已排名全球第一。中国共拥有24个全球百强创新集群,其中深圳-香港-广州集群排名首次跃居全球之首,北京(第4位)、上海-苏州(第6位)集群位居前十,是全球专利申请、科技创新以及创业投资的热点区域。

此外,中国的品牌价值稳居全球第二。2025年全球前5000个品牌中,中国品牌总价值达1.81万亿美元,较2024年增长2.84%。

《报告》还指出,中国高科技产品的出口以及在全球价值链中的地位持续增强,特别是在人工智能、半导体和绿色技术领域表现出色。

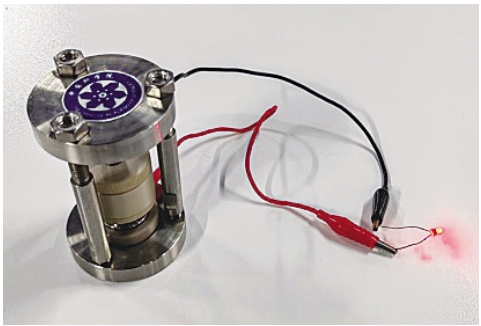
科学家研发出首例氢负离子原型电池

本报讯(记者孙丹丹)中国科学院大连化学物理研究所研究员陈萍、研究员曹瀚军、副研究员张伟进团队在氢负离子导体开发及应用方面取得重要进展。团队开发出新型核壳结构氢负离子电解质,并成功构建了首例氢负离子原型电池。相关成果9月17日发表于《自然》。

氢负离子电池利用离子的移动来存储和释放能量。然而,由于缺乏能同时满足高离子电导率、低电子电导率、优良热稳定性和电化学稳定性,以及与电极材料良好兼容性的电解质材料,氢负离子电池尚处于原理概念阶段,其研发具有重要的科学意义和应用前景。

2018年,团队启动氢负离子传导研究,并于2023年提出“晶格畸变抑制电子电导”策略,研制出室温超快氢负离子导体。在此基础上,团队以低电子传导且高稳定性的氢化钡钨薄层包覆稳定性较差的三氯化铷,形成了一种新型核壳结构复合氢化物。该材料在室温下即可展现快速的氢负离子传导特性,兼具优异的热稳定性与电化学稳定性,是一种理想的电解质材料。

基于上述新型氢负离子电解质材料,团队利用经典的储氢材料氢化钨做正极,贫氢的二氯化铷做负极,组装出氢负离子原型电池。实验数据显示,该电池正极首次放电容量高达984毫安时/克,且经过20次充放电循环后,



氢负离子原型电池。研究团队供图

仍能保持402毫安时/克的容量。团队进一步搭建了叠层电池,把电压提升到1.9伏,并成功点亮了黄色LED灯,证明了氢负离子电池为电子设备供电的可行性。这标志着我国科研人员实现了氢负离子电池从原理概念到实验验证的跨越。

氢负离子电池代表了一种全新的储能技术路径,有望在大规模储能、储氢、移动电源、特种电源等领域发挥重要作用。未来,团队将聚焦氢负离子电池核心材料研制和性能优化,积极拓展应用场景,为我国绿色能源发展提供有力的技术支撑。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1038/s41586-025-09561-3>

智能防护结构让无人机“抗冲击”同时“自发电”

本报讯(见习记者李媛)近日,西北工业大学机电学院教授齐乐华团队在兼顾冲击防护与自供能传感的力学超结构方面取得新进展。相关研究成果发表于《科学进展》。

湍流引起的机翼结构振动和气流冲击已成为影响中小型固定翼无人机(UAV)适航安全的主要因素之一。高可恢复弹性密度的力学超结构可增强材料和结构性能,如高效机械能存储、强负载、高抗冲击性和优异运动敏捷性。然而,高刚度、高强度与可恢复大应变是矛盾的,同时实现以上性能是现有材料或结构面临的世界性难题。此外,低延迟感知、分析实时振动/冲击载荷信息也是UAV适航预警的关键需求,受限于电阻式、压阻式、电容式等传感器依赖额外电源供给与结构轻

量化约束的矛盾。

团队通过手性双曲超结构(THM)和自供能感知单元(TENG)协同设计,研发的THM-TENG智能防护结构高效实现了冲击载荷的弹性可恢复吸收。在此过程中,THM-TENG将冲击能转化为电能,同时实现外部载荷的自供能传感。该防护结构集成了微控制单元MCU、无线传输系统、警报系统以及GPS定位系统,在UAV中展示了优异的防护-感知效果。

该研究有望为新一代航空航天、机器人和智能无人系统设备的关键防护结构设计提供新思路。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1126/sciadv.adw6179>

“镜像生命”研究红线应划在何处？专家们忧心忡忡



本报讯 据《自然》报道,近日,科学家在英国曼彻斯特举行会议,讨论是否要限制最终可能催生出“镜像生命”的研究,即由与自然界中发现的分子呈镜像关系的分子构建合成细胞。

过去一年,许多科学家对可能导致此类细胞诞生的实验表达了担忧,认为这些细胞会对人类健康和环境构成巨大威胁。然而,考虑到潜在的益处,学术界在是否以及如何限制镜像生物学研究上存在分歧。

自然界中大多数生物分子具有特定的手性,即它们在空间结构上呈现出“左”或“右”的形态。例如,蛋白质由左旋氨基酸构成,DNA双螺旋线一样缠绕。镜像生物分子是指具有相反手性的分子,镜像细胞则是所有分子都具有相反的手性。

一些研究人员表示,对镜像生物分子进行研究,有助于弄清楚手性是如何形成的,也可以将它们用作治疗性药物。这种方法已在临床上取得了成功。2017年,美国食品药品监督管理局批准了一种含有镜像氨基酸的小分子肽——依特卡肽,用于治疗慢性肾病患者。

天然酶难以分解镜像生物分子,这种抗降解能力可能是一把双刃剑。一些研究人员指出,如果有朝一日完整的镜像细胞被成功制造出来,它或许会在人体内不受控制地增殖,或

在环境中肆意扩散。

德国生物技术公司Aptarion创始人兼首席执行官Sven Klussmann认为,考虑镜像生命的潜在风险是合理的。“但我们目前不应恐慌,也不应过早地限制相关研究。”该公司致力于研发治疗性镜像RNA。

不过,美国明尼苏达大学明尼阿波利斯分校的Kate Adamala警告称,那些可能催生出镜像生命的研究,其风险将超过任何潜在益处。“这些益处通过常规生物学的其他方法也能实现。”

“几乎所有人都认为镜像细胞会是一件坏事。”美国克雷格·文特尔研究所的John Glass表示,虽然生物学家合成了一些镜像DNA、RNA和氨基酸,但目前尚无人构建镜像细胞。即使镜像细胞的制造具有可行性,也可能需要数十年才能实现。

早在2019年,在人们尚未意识到潜在风险之时,美国国家科学基金会曾为启动镜像细胞研究提供了科研资助。2024年12月,38位科学家在《科学》上发文表达了担忧,称这项研究可能导致“前所未有且不可逆转”的危害。此后,非营利组织“镜像生物学对话基金”资助了一系列会议并提出相关建议,以规避镜像生命可能带来的威胁。

今年6月,研究人员齐聚法国巴黎,呼吁资助机构不要为镜像细胞相关研究提供支持,并建议限制那些可能为镜像生命研究提供便利的领域。9月,除了在曼彻斯特召开的会议,还有由美国国家科学院、工程院和医学院召开的会议,研究人员将继续推进这一讨论,并审慎思考应在何处划定红线。(王方)